

**ACADEMIA DE INGENIERÍA**

**INGENIERÍA Y FÍSICA DE PLASMAS**

DISCURSO DEL ACADÉMICO ELECTO

**EXCMO. SR. D. JUAN RAMÓN SANMARTÍN LOSADA**

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN PÚBLICA  
EL DÍA 18 DE JUNIO DE 1998

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO

**EXCMO. SR. D. AMABLE LIÑÁN MARTÍNEZ**



MADRID MCMXCVIII

# INGENIERÍA Y FÍSICA DE PLASMAS

ACADEMIA DE INGENIERÍA

INGENIERÍA Y FÍSICA DE PLASMAS

DISCURSO DEL ACADÉMICO ELECTO

**EXCMO. SR. D. JUAN RAMÓN SANMARTÍN LOSADA**

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN PÚBLICA  
EL DÍA 18 DE JUNIO DE 1998

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO

**EXCMO. SR. D. AMABLE LIÑÁN MARTÍNEZ**



MADRID MCMXCVIII

## CONTENIDO

DISCURSO DEL ACADÉMICO ELECTO EXCMO. SR.  
D. JUAN RAMÓN SANMARTÍN LOSADA:

INGENIERÍA Y FÍSICA DE PLASMAS

5

CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO EXCMO. SR.  
D. AMABLE LIÑÁN MARTÍNEZ

27

Excelentísimo señor Presidente,  
Excelentísimos Señores Académicos,  
Señoras y Señores:

Agradezco profundamente la benevolencia de esta ilustre corporación al elegirme como uno de sus miembros. Es una gran satisfacción verme acogido entre los académicos Amable Liñán y Antonio Barrero, de los que me puedo enorgullecer en ser discípulo ó maestro. Esa elección, no obstante, me produce perplejidad por lo reducido de mis méritos.

Quizá hay coherencia en la inclusión entre un maestro y un discípulo; esto haría plausible mi elección. En ella, además, habrá habido elementos de azar. Mi propia posición en la Escuela de Ingeniería Aeronáutica se debe al azar: quiero recordar ahora a José Luis Urrutia, mi antecesor, cuya muerte en el trabajo, en la Escuela, quebró una labor renovadora; y a otro profesor de la Escuela muerto en el aula, Ignacio Da Riva, quién me introdujo en la investigación siendo yo aún estudiante. Se debe al azar haberme encontrado con edad y cierta experiencia en un momento en el que las condiciones sociales propiciaron la eclosión de jóvenes investigadores, muy brillantes. La decisión de la Academia, sin embargo, pudo ser un acto deliberado de apoyo a la siguiente idea: investigar, en Física de Plasmas en mi caso, es labor de ingenieros. Quiero mostrar dos ejemplos de ingeniería de plasmas como argumento en favor de esa idea. Aprovecharé para describir las diferencias entre el plasma y un gas como el aire.

Creo que la Academia es generosa y perspicaz en su percepción de lo equívoco del término "ingeniero". El fundador de la Física de Plasmas fué un químico, Irving Langmuir, doctorado con Nernst en Gotinga y Premio Nóbel en 1932. Langmuir trabajó cuarenta y un años, no en una Universidad, sino en una posición típica de ingeniero, en una empresa, General Electric. En los años cincuenta, al poco de iniciarse el programa americano sobre Fusión Termonuclear, otra empresa, Westinghouse, situó a un investigador permanentemente en el principal centro federal de plasmas, donde Lyman Spitzer, un astrofísico de la Universidad de

Princeton, había inventado una máquina de fusión. En Europa, el principal centro sobre plasmas de fusión es una escuela de ingenieros, la Politécnica de París. La tradición investigadora que los ingenieros de la Politécnica establecieron en el siglo XIX es universalmente reconocida, aquí me bastará recordar tan sólo algunos nombres: Arago, Biot, Cauchy, Dulong, Fresnel, Navier, Poisson, Poncelet, Sadi Carnot.

En otro orden de consideraciones, mi propia especialización como investigador se decidió en unos seminarios sobre plasmas que Liñán impartió en nuestra Escuela, poco antes de irme a Estados Unidos, cuando acabé Física e Ingeniería Aeronáutica, al rechazar yo una beca de la NASA, por desacuerdo con la universidad de destino, Liñán me buscó apoyo en otra, y generosamente me adelantó dinero. Mi Tesis sobre plasmas fue realizada en un Departamento de Ingeniería Aeroespacial. Finalmente, habiendo trabajado en plasmas durante seis años en tres Universidades americanas, tan sólo estuve un año en un Departamento ajeno a la Ingeniería.

Empezaré por recordar que en un gas a temperatura alta y densidad baja los átomos pierden electrones y quedan como iones de carga positiva. Un gas así ionizado se llama plasma, aunque es globalmente neutro contiene cargas libres de signo opuesto, iones y electrones, y conduce la electricidad. Casi toda la materia del Universo es plasma.

Las condiciones de plasma, temperatura alta y densidad baja, son opuestas a las condiciones de la vida. En la biosfera el plasma es un objeto exótico y de reciente descubrimiento, aunque la luz de las estrellas, y la radiación solar que mantiene la biosfera, provienen de plasmas estelares. Conocemos estructuras fundamentales del Universo por la observación de señales luminosas de plasmas lejanos. En la Tierra hay plasmas a densidad y *temperatura bajas, en los que sólo una fracción de los átomos están* ionizados; este es el caso de la ionosfera, y de los plasmas industriales y de laboratorio, donde son determinantes los procesos de ionización en avalancha, en el espacio ó en el tiempo. A temperatura baja pero densidad alta, se habla de plasmas de efecto cuántico, caso de los electrones libres de un metal. Finalmente, a temperatura y densidad altas, el plasma, estrictamente, no es un gas.

El plasma presenta un fenómeno de apantallamiento eléctrico. Una carga en un plasma rechaza las cargas libres de su mismo signo, atrae las de signo opuesto, y forma una capa de carga neta que apantalla al resto del plasma. El espesor de esa capa se llama longitud de Debye. Peter Debye, Nóbel de Química en 1936, estudió el apantallamiento de partículas coloidales cargadas, en suspensión en una solución electrolítica. Uno de los mayores físicos del siglo, Lev Landau, mostró que coloides cargados en suspensión podían exhibir una estructura espacial regular, como un cristal, lo que se podría comprobar en el espacio, en condiciones de gravedad reducida. El apantallamiento de cargas interviene en las magnetosferas y los anillos de los grandes planetas exteriores, en los cometas, y en las nubes interestelares, donde hay plasmas que contienen polvo cargado en suspensión. Planetas y estrellas como el Sol nacen en estos plasmas coloidales, en la envoltura fría de alguna estrella anterior. En frase de Hannes Alfvén, en su discurso de Nóbel de Física de 1971, " en el principio era el plasma".

En el plasma hay también apantallamiento de ondas electromagnéticas. Un plasma en equilibrio es eléctricamente neutro en todo su volumen. Cualquier desplazamiento medio de electrones respecto a los iones crea un campo eléctrico, el cual hace retornar a los electrones, que sobrepasan la posición de equilibrio y oscilan en vaivén. La frecuencia de esta oscilación del plasma, llamada frecuencia de Langmuir, depende de la concentración de las cargas pero es mucho mayor que la frecuencia de sus colisiones. Cargas libres y sin colisiones se polarizan en sentido opuesto al campo eléctrico de una onda incidente, lo que da una constante dieléctrica menor que la unidad. A frecuencias inferiores a la de Langmuir la constante dieléctrica es menor que cero y la onda incidente es totalmente reflejada por los electrones del plasma, que así apantallan su interior. Hay un efecto similar en un antiguo dispositivo electrónico, el espejo, una lámina de metal con un vidrio protector: la frecuencia de la luz es inferior a la frecuencia de Langmuir de los electrones libres del metal. La reflexión total no es fenómeno de superficies: las ondas de radio se reflejan totalmente en el interior de la ionosfera, cuya frecuencia de Langmuir depende de la altitud.



El plasma, en sus movimientos, difiere de mezclas como el aire por la tendencia a la neutralidad eléctrica y porque las masas de iones y electrones son muy dispares. En la ionosfera, la masa del ión dominante, oxígeno, es treinta mil veces mayor que la masa electrónica. Las masas ó inercias dispares de iones y electrones dan lugar a dos escalas de tiempo. Sólo los electrones participan en los movimientos de escala rápida, que incluyen la respuesta dieléctrica del plasma a ondas de alta frecuencia. La constante dieléctrica que determina esa respuesta evoluciona en una escala de tiempos lenta, con la inercia iónica y las colisiones entre cargas. En la escala lenta puede haber un efecto cuadrático medio de la respuesta rápida; un ejemplo es la energía de ondas que escapa de la fotosfera del Sol y calienta la corona solar hasta un millón de grados. El plasma es "cuasineutro" en la escala lenta, porque bastan pequeñas diferencias entre las concentraciones iónica y electrónica para crear un campo eléctrico que liga a las dos especies.

Aunque el aire es una mezcla, en condiciones usuales se mueve en equilibrio termodinámico local, como un solo fluido; las frecuentes colisiones entre moléculas mantienen tan próximas las temperaturas, y las velocidades, del oxígeno y el nitrógeno, que se habla de temperatura y velocidad del aire. Por el contrario, en condiciones similares el plasma es un sistema de dos fluidos, en equilibrio local incompleto. Las temperaturas iónica y electrónica pueden ser diferentes porque la disparidad de masas reduce el intercambio de calor en las colisiones. Las colisiones también permiten velocidades iónica y electrónica diferentes, porque el movimiento de escala lenta es cuasineutro y la inercia iónica determina la velocidad del sonido del plasma.

En el aire, los procesos de difusión térmica y viscosa, que dan lugar a transporte irreversible de energía y cantidad de movimiento, pueden tener importancia comparable. En un plasma, los electrones, mucho más ligeros que los iones, dominan el transporte. La cantidad de movimiento electrónica y, a fortiori, su difusión pueden ignorarse en movimientos cuasineutros. La difusión de la energía, el flujo de calor, resulta así el proceso de transporte dominante en un plasma, y puede determinar completamente la estructura de una onda de choque.

Las moléculas del aire tienen un tamaño bien definido, por lo que sus colisiones semejan choques entre sólidos. El plasma también difiere del aire en este respecto, porque las fuerzas eléctricas son de largo alcance y no fijan un tamaño de cargas. El tamaño efectivo de las cargas en las colisiones depende de la energía de su propio movimiento, que se mide, en media, por la temperatura. El tamaño de las cargas, y la frecuencia de sus colisiones, decrecen rápidamente al crecer la temperatura. A temperaturas ya altas, se hace difícil el calentamiento adicional de un plasma, por absorción de radiación ó el paso de una corriente eléctrica.

En cada colisión en el aire sólo intervienen dos moléculas. Por el contrario, en un plasma, y debido al largo alcance de las fuerzas eléctricas, cada carga colisiona simultáneamente con un gran número de iones y electrones lejanos. El alcance de las fuerzas viene limitado por la longitud de Debye, que es mayor que el tamaño efectivo de las cargas y menor que la distancia que recorren en media entre cada dos colisiones. Los débiles efectos de las colisiones lejanas se suman de modo incoherente, como si cada una ocurriese en ausencia de otras. La efectividad de las colisiones aumentaría si las cargas individuales guardasen correlación en sus movimientos. Por ejemplo, iones que han perdido dos electrones tienen mayor frecuencia de colisión que iones en número doble que han perdido un electrón.

La correlación de movimientos es usual en plasmas muy calientes. En equilibrio, un plasma es un gas ideal, como el aire: la energía media de interacción de iones y electrones es mucho menor que la energía de su movimiento térmico. A altas temperaturas, sin embargo, el recorrido medio entre colisiones excede del tamaño del plasma, y se producen interacciones colectivas, a distancias mayores que la longitud de Debye. Plasmas muy calientes están lejos del equilibrio local y exhiben turbulencia en forma de fuertes fluctuaciones, en ondas excitadas térmica ó externamente. Tales fluctuaciones ejercen efectos de colisión sobre las cargas individuales.

La turbulencia de plasma caliente es opuesta a la turbulencia clásica de un gas como el aire. En turbulencia clásica había equilibrio termodinámico local, el corto recorrido medio entre colisiones resultaba en una débil

difusión colisional. Aún más particular es la turbulencia de un plasma magnetizado. Bajo la acción de un campo magnético las cargas describen hélices diamagnéticas de eje paralelo al campo, y el transporte es complejo, hay cinco coeficientes de viscosidad, y leyes de Fourier y Ohm con efectos Hall, Righi-Leduc, Seebeck, Ettinghausen, Peltier y Nernst. Si el radio de hélice electrónico es pequeño frente al recorrido medio entre colisiones, hace el papel efectivo de recorrido medio. El transporte colisional perpendicular al campo magnético se reduce drásticamente, se puede tener difusión colisional débil sin equilibrio termodinámico local.

A diferencia del aire, un plasma no magnetizado sostiene ondas eléctricas longitudinales, que producen fluctuaciones de carga y no pueden escapar del plasma: hay ondas Langmuir, de frecuencia superior pero próxima a la de Langmuir, y ondas acústicas, de baja frecuencia y evolución cuasineutra. Landau descubrió que, aún en ausencia de colisiones, las ondas longitudinales se amortiguan por una resonancia entre su campo eléctrico y cargas con velocidad próxima a la velocidad de la onda. Esa amortiguación no se da en las ondas electromagnéticas, transversales, que tienen velocidad mayor que la luz, no producen fluctuaciones de carga, y se propagan a cualquier frecuencia por encima de la frecuencia de Langmuir. La variedad de ondas es mucho mayor en un plasma magnetizado. Un plasma también radia de modo incoherente: radiación de frenado en las colisiones ión-electrón (como en un aparato de rayos X) y radiación de ciclotrón en el movimiento helicoidal electrónico. Las pérdidas por radiación incoherente crecen con la temperatura y hacen más difícil alcanzar altas temperaturas.

El plasma es el elemento esencial de la Fusión Termonuclear; y brinda al ingeniero la posibilidad de una máquina térmica definitiva. En la máquina térmica usual, el calor liberado en una reacción química entre átomos calienta un gas, que acelera un sólido ó sube un peso. En la fusión termonuclear reaccionan núcleos de deuterio, que es un isótopo del hidrógeno. En agua natural hay un núcleo de deuterio por cada siete mil núcleos de hidrógeno, separando el deuterio se obtiene "agua pesada", un combustible con valor de energía por litro un millón de veces mayor que el de un combustible químico. En un litro de agua natural hay igual energía que en trescientos litros de gasolina, y en los mares hay energía para cubrir el consumo mundial por el tiempo de vida que le resta al Sol. Por otra parte, la conversión directa de energía nuclear a eléctrica en la fusión evitaría el ciclo termodinámico, y el calentamiento de aguas y atmósfera. Además la fusión no ofrece peligro de descontrol, ni produce dióxido de carbono, trazas contaminantes del aire, ó desechos radioactivos.

El grial de la fusión termonuclear, buscado en grandes laboratorios con fondos y personal abundantes, a lo largo de medio siglo, ya ha consumido a una generación de investigadores. Los hidrocarburos resultan de la acción del Sol en la biosfera, y el uranio de la fisión fué cocinado en una estrella anterior al Sol, pero la fusión es una etapa difícil de esa cocción. La fusión exige vencer la repulsión eléctrica entre núcleos hasta distancias a las que ocurre un efecto cuántico de túnel. Hay que preparar un plasma de deuterio a temperatura muy alta para aprovechar la energía del movimiento térmico, la velocidad de reacción ó quemado de la fusión crece rápidamente con la temperatura. Las primeras máquinas quemarán deuterio y tritio, porque requieren temperaturas menores, unos cien millones de grados. El tritio es casi inexistente en agua natural pero su fusión con deuterio produce neutrones, que regeneran el tritio en una envoltura de litio. También produce iones helio, que ceden al plasma energía de la reacción. El plasma ha de tener una temperatura mínima tal que el calor depositado por los iones helio exceda las pérdidas por radiación de frenado.

La velocidad del quemado también crece con la concentración iónica, ó la densidad, del plasma. Las condiciones de temperatura y densidad

deben persistir durante su quemado, pero a esas temperaturas es imposible confinarlo entre paredes. En las estrellas, el plasma es confinado en el interior por la gravitación de la enorme masa propia, pero en una máquina de fusión el confinamiento sería magnético. En geometrías simples el campo magnético ejerce una presión sobre el plasma, que se comporta como un material diamagnético. El equilibrio mecánico exige que la suma de presiones térmica y magnética sea uniforme, con mayor presión magnética en el exterior. La presión magnética puede alcanzar las mil atmósferas, y la presión térmica sería una pequeña fracción del total. A cien millones de grados, la concentración de cargas sería un millón de veces menor que la concentración de moléculas en el aire.

La uniformidad de la presión total en los reactores por confinamiento magnético no implica equilibrio termodinámico, iones y electrones se difunden perpendicularmente al campo magnético. Como el recorrido medio efectivo de las cargas es su radio de hélice, se esperaban tiempos de confinamiento largos en plasmas fuertemente magnetizados. El plasma, sin embargo, ha exhibido en todos los casos un estado turbulento, con ausencia de equilibrio termodinámico local; la difusión de cargas y energía ha sido más rápida que la correspondiente a transporte colisional. Ha pasado medio siglo en ir reduciendo esa turbulencia, y alargando el tiempo de confinamiento, en diversas máquinas magnéticas. El CIEMAT, la antigua Junta de Energía Nuclear, dispone de una máquina de tipo Helia. Benjamin Carreras ha hecho numerosas contribuciones en este campo, en el Laboratorio Federal, americano, de Oak Ridge.

Hace casi treinta años se inició otra vía a la Fusión. Una esfera de plasma no confinado puede quemarse completamente durante su libre escape al vacío si tiene un tamaño mínimo. La duración del escape es proporcional al radio de la esfera, mientras que la duración del quemado es inversamente proporcional a su densidad. La energía invertida en crear el plasma de tamaño mínimo decrece rápidamente al aumentar la densidad, pero es desmesurada incluso para el deuterio-tritio sólido. La solución es comprimir un blanco esférico, con un radio del orden del milímetro, hasta densidades muy altas, mediante un pulso láser corto, de alta potencia e intensidad, y haces multidireccionales. Se llama a esta vía "confinamiento inercial". Guillermo Velarde inició un Programa de trabajo en este campo en la Junta de Energía Nuclear.

El recorrido medio de los iones helio antes de depositar la energía de la reacción es mucho menor que el radio mínimo de la esfera de plasma, el calentamiento del plasma y el intercambio de calor entre iones y electrones, son mucho más rápidos que el quemado. Se puede reducir la energía invertida en el plasma calentando sólo una pequeña región central, de radio igual al recorrido medio de los iones helio. La fusión en esa región interior calienta el plasma próximo, frío y muy denso, e inicia una onda de quemado que se propaga hacia el exterior del blanco, mientras sigue quemándose su interior.

La sola compresión, sin calentamiento, de la región exterior requiere cierta energía. Si se comprime un sólido a temperatura baja, se produce ionización cuando cierta energía cuántica que crece con la densidad, la energía de Fermi, alcanza la energía de ionización. Para una densidad hasta diez mil veces la del sólido, la región fría del blanco es un gas degenerado cuánticamente, con una temperatura equivalente, dada por la energía de Fermi, que es inferior a diez millones de grados. La energía de pulso láser que lleva a la fusión puede reducirse en un factor de diez, a un millón de Julios.

Transferir energía de la luz al blanco, comprimirlo sin calentar su exterior, y mantener su simetría esférica bajo la irradiación de diez o quince haces del láser, es difícil. La energía debe alcanzar el blanco de modo indirecto porque la absorción de la luz produce calentamiento; la frecuencia

del láser ha de ser menor que la frecuencia de Langmuir a la densidad del estado sólido. En esas condiciones se produce la ablación continua del blanco, del que escapa una corona de plasma al vacío. Hay una superficie, de ablación, que separa al blanco propio, que es el material frío sometido a compresión, del plasma caliente en expansión.

En el plasma hay una superficie crítica, con una densidad, crítica, tal que la frecuencia de Langmuir es igual a la del láser. La luz se refleja antes de alcanzar la superficie crítica, a una densidad que depende del ángulo de incidencia local. En la propagación de ida y vuelta, entre vacío y punto de reflexión, la luz es parcialmente absorbida en colisiones ión-electrón, en un proceso inverso a la radiación de frenado. La absorción colisional es menor a mayor intensidad de la luz y menor frecuencia láser porque se reduce la frecuencia de colisión, por la mayor temperatura y la menor densidad.

Luz láser que llega al punto de reflexión a incidencia oblicua es absorbida en un fenómeno de resonancia, aún en ausencia de colisiones. El campo eléctrico incidente excita en la superficie crítica ondas longitudinales Langmuir, que calientan el plasma por amortiguación de Landau. La absorción de resonancia aumenta con la intensidad evanescente de la luz que llega del punto de reflexión a la superficie crítica. Esa intensidad es mayor a mayor longitud de onda del láser, y menor distancia al punto de reflexión. Una mayor intensidad de la luz reduce esa distancia, porque la presión de la radiación hace más abrupto al perfil de densidad en la zona de reflexión.

Luz láser intensa se acopla a ondas propias del plasma. La luz excita parejas de ondas, longitudinal y transversal. En el caso de una onda longitudinal acústica, aumenta la reflectividad del plasma y se reduce la absorción. En el caso de una onda longitudinal Langmuir, se producen electrones de alta energía por amortiguamiento de Landau, electrones que penetran y precalientan el blanco, y degradan la compresión. Estos efectos se pueden reducir con una óptica láser de mayor ancho de banda. También se excitan parejas de dos ondas longitudinales, pero el efecto es menor porque se limita a capas de plasma delgadas, a densidades próximas a la crítica ó a un cuarto de la crítica.

Para luz muy intensa se da turbulencia por excitación en cascada de nuevas parejas de ondas, a longitudes de onda progresivamente mayores, ó menores, en una turbulencia fuerte con formación y colapso de depresiones de densidad. Un haz láser en un plasma también se inestabiliza por filamentación ó autoenfocado del haz, para perturbaciones perpendiculares ó paralelas a la dirección de propagación. Cualquier aumento local de la intensidad de la luz produce una depresión de densidad por mayor temperatura ó mayor presión de radiación; la refracción trae más luz a la depresión, porque la constante dieléctrica de un plasma es mayor a menor densidad.

Una pequeña fracción de la energía láser absorbida viaja por difusión térmica hacia el blanco. El flujo de calor es transportado por electrones de alta energía, por lo que tiene un carácter no local, en oposición a la ley de Fourier usual. El gradiente térmico se hace abrupto en la región de ablación, a densidad alta y temperatura baja, y resulta en una presión bien definida en la superficie de ablación. La presión de ablación envía al interior ondas de presión, de velocidad creciente con la densidad. La coalescencia de esas ondas produce una onda de choque y fuerte calentamiento, a una distancia del centro igual al recorrido medio de los iones helio de fusión.

El flujo de calor transfiere al blanco asimetrías en la irradiación láser, aunque suavizadas, tanto más cuanto menor es la frecuencia láser. Una presión de ablación asimétrica degrada el proceso de compresión porque la superficie de ablación, que se acelera hacia el interior, es inestable: en esa aceleración el fluido denso del blanco descansa sobre un fluido ligero, el plasma. El proceso mismo de ablación, y el flujo de calor en el exterior, así como un posible pulsado de la radiación láser, reducen la inestabilidad. Por otra parte, asimetrías en la irradiación láser dan lugar a un campo magnético que afecta al transporte de calor.

Antonio Barrero, y José Luis Montañés, Javier Sanz, Rafael Ramis, José Antonio Nicolás, Eduardo Ahedo, Julio Ramírez, también Fernández-Feria, Hilario, Ibáñez, Hüller, Minotti, Reinicke, Tagare, trabajaron en nuestra Escuela en plasmas de confinamiento inercial. Esta vía a la fusión se diversificó rápidamente en los grandes laboratorios. Para optimizar la compresión, blanco y pulso tienen estructuras espacial y temporal



complejas. Una reciente propuesta ahorra energía manteniendo frío todo el blanco durante toda la compresión, e irradiándolo al final con intensidades de un trillón de vatios por centímetro cuadrado: la alta presión de radiación acerca la superficie crítica al blanco y permite a electrones de alta energía penetrar y encender su interior. La inestabilidad de la superficie de ablación, cuyo análisis definitivo se debe a Javier Sanz, se reduce irradiando con láser una cavidad que aloja al blanco, al que llega radiación X isotrópica emitida por las paredes. Es posible substituir el láser por un haz de iones. Uno de los dos códigos numéricos en uso en Europa para simular todo el proceso se debe a Rafael Ramis.

Hablaré brevemente de un segundo ejemplo de ingeniería de plasmas. Una amarra espacial es un cable largo, flexible y ligero que une a dos satélites, y les permite orbitar con igual período a alturas diferentes. Las fuerzas gravitatoria y centrífuga varían en sentido opuesto a lo largo del cable, y lo mantienen tenso en posición vertical estable. La tensión en el cable es pequeña porque, incluso para una longitud de cien kilómetros, los radios de órbita extremos no difieren en más de uno por ciento. Esto permite usar cables finos, ligeros, y flexibles. Una amarra típica tendría más de diez kilómetros de largo y menos de un centímetro de grosor.

El concepto de amarra espacial data de los años setenta. Un Manual de la NASA del año pasado recoge muchas aplicaciones técnicas. Las amarras, por ejemplo, proporcionarían una gama de condiciones de microgravedad controlada: Las fuerzas centrífuga y gravitatoria son iguales en algún punto del cable; un objeto en cualquier otro punto estaría sometido a una gravedad residual. Una amarra permitiría realizar transferencias orbitales económicas, variando periódicamente su longitud, ó cortándola, sea durante el proceso de despliegue, sea al establecerse la posición vertical. Una amarra espacial de cien kilómetros, con un satélite instrumental en su extremo inferior, permitiría el estudio in situ de la atmósfera entre los ochenta y los ciento treinta kilómetros de altura, lo que fué imposible hasta ahora: la densidad del aire es allí demasiado baja para globos-sonda, y demasiado alta para satélites. La proximidad del satélite instrumental a la superficie terrestre también facilitaría la medición de anomalías gravitatorias y magnéticas.

Si la amarra fuera metálica, su movimiento orbital en presencia del campo magnético terrestre generaría una fuerza electromotriz; éste es el mismo proceso de inducción magnética de un simple generador eléctrico. El circuito conductor se cierra a través del plasma ionosférico. Una amarra metálica, conductora, podría así producir potencia eléctrica en algún circuito interpuesto. La energía generada proviene de la energía mecánica orbital: el campo magnético terrestre ejerce una fuerza de frenado sobre la corriente de la amarra. Esto tiene una aplicación inmediata.

Paradójicamente, se precisa energía, almacenada a bordo como combustible de cohete, no sólo para subir un satélite a una órbita a mayor

altura, sino también para una bajada rápida, desde alturas donde la resistencia aerodinámica es muy débil. El frenado magnético sobre una amarra conductora llevaría a una pronta reentrada en la baja atmósfera, produciendo energía a bordo en lugar de consumirla. Alternativamente, una amarra podría ser fuente de potencia eléctrica, en emergencias ó mantenimiento, ó en ausencia de paneles solares, usando propulsión química para compensar el frenado magnético, este proceso dual es unas dos veces más eficiente que la generación directa de energía en una célula de combustible, que desaprovecha la energía orbital del combustible mismo. Finalmente, se podría obtener propulsión en vez de frenado invirtiendo el sentido natural de la corriente en la amarra, mediante paneles solares.

La amarra standard lleva recubrimiento aislante, y electrodos u otros elementos contactores en los extremos para el contacto eléctrico con la ionosfera. El principal escollo a salvar es como captar electrones del tenue plasma ambiente, hasta diez amperios de corriente típica, en el electrodo polarizado positivamente. La amarra italoamericana TSS, desplegada en órbita hace dos y cinco años, llevaba una esfera de radio próximo al metro. Este es un electrodo ineficiente porque, en la ionosfera, la longitud de Debye y el radio de hélice electrónico son pequeños, del orden del centímetro. El campo geomagnético, que guía a los electrones según una hélice, impide la convergencia de corriente hacia el electrodo, los electrones que éste atrae apantallan la carga positiva de su superficie. Se han ensayado, con poco éxito, contactores que crean una nube de plasma y emiten una débil corriente iónica, para reducir el apantallado eléctrico y destruir el guiado magnético.

Para el estudio in situ de plasmas espaciales y de laboratorio se usan de modo universal pequeños electrodos, ó sondas de Langmuir, midiendo como varía la corriente a la sonda con su voltaje de polarización. El análisis de este problema clásico depende de muchos parámetros: longitud de Debye, radios de hélice, y temperaturas, de iones y electrones, recorrido medio efectivo de las cargas, tamaño y parámetros de forma de la sonda, velocidad relativa al plasma, voltaje de polarización. El electrodo de una

amarra plantea un problema nuevo porque el propósito de una sonda de Langmuir no era maximizar la corriente.

Un electrodo esférico, como el de la amarra TSS, se caracteriza por una sola longitud, su radio. Para eliminar los efectos de apantallado y guiado magnético el radio habría de ser menor que la longitud de Debye y que el radio de hélice electrónico, lo que haría muy pequeña la superficie colectora de la esfera. La solución a esa dificultad es usar un electrodo con dos longitudes muy dispares, un cilindro muy largo. Si el cilindro es suficientemente largo, se tiene una superficie colectora grande cualquiera que sea el radio. Por otra parte, la captura de electrones depende de los gradientes más intensos, asociados a la dimensión corta, al radio. Si éste es suficientemente pequeño no hay efectos de apantallado ó guiado magnético; se habla de corriente máxima.

Se demuestra que hay corriente máxima si el radio del cilindro no excede a la longitud de Debye, y radio y longitud de Debye no exceden de una fracción del radio de hélice electrónico. También se demuestra que la corriente máxima de una cinta es mayor que la de un cilindro circular. Otra ventaja del nuevo concepto es que no requiere electrodo: Basta eliminar el recubrimiento aislante de la amarra y utilizar como colector de electrones el segmento a potencial positivo, que puede tener kilómetros de largo!

La colección de corriente por una amarra sin aislante es insensible a las caídas de densidad de plasma que ocurren regularmente en órbita, porque la longitud de cable a potencial positivo se adapta de modo automático. Esto hará posible el uso nocturno de la amarra. Por otra parte, la ley de corriente máxima de una sonda cilíndrica de Langmuir permite un fácil diseño de amarras óptimas. Las actuaciones de una amarra varían rápidamente con su longitud. En una amarra generadora un incremento de potencia en un factor de cien exige una longitud sólo tres veces mayor. Una amarra de veinte kilómetros produciría cien kilovatios.

Eduardo Ahedo en nuestra Escuela y Manuel Martínez-Sánchez en el Instituto Tecnológico de Massachusetts participaron en el concepto de amarra sin aislante ni electrodo, que será probado en órbita en agosto del año 2000, en un experimento de la NASA a bordo de un cohete Delta 2. Se está considerando usar una amarra propulsora sin aislante en la Estación

Espacial Internacional, para mantenerla en órbita permanente, contrarrestando la débil resistencia aerodinámica. NASA considera amarras conductoras para la exploración de Júpiter y su luna Europa. En Júpiter, el equivalente de la órbita geoestacionaria en la Tierra está dentro de su ionosfera, una amarra conductora, orbitando a mayor altura en Júpiter, ascendería al tiempo que genera energía, una de las paradojas termodinámicas de la gravitación

Una amarra conductora permite experimentos en la ionosfera. En propulsión ó generación de potencia, se excitan ondas Alfvén de compresión a la frecuencia "híbrida inferior", y ondas Alfvén de cortadura en un espectro de frecuencias. La radiación transporta carga que cierra el circuito conductor en dos estelas planas desde los extremos de la amarra, donde se intercambia corriente con la ionosfera. La luna Ío de Júpiter, sometida a enormes fuerzas de marea por las lunas vecinas, es una amarra conductora gigante, pero el circuito se cierra probablemente por corriente continua en la ionosfera de Jupiter. Modulando la corriente de una amarra se podría radiar una mayor variedad de ondas. Una amarra sin aislante ni contactor en ningún extremo sería una fuente eficaz de haces de electrones para el estudio de efectos de aurora.

La amarra espacial conductora es ejemplo de afinidad entre máquina de ingeniero e instrumento de científico, en este caso la sonda de Langmuir. También es ejemplo interesante del riesgo de una concentración excesiva de la investigación. El programa espacial italiano, que giró en torno a las amarra espaciales durante veinte años, involucrando a multitud de universidades y empresas, ha colapsado. Hay un riesgo semejante en la planificación excesiva. Un texto anónimo del *American Journal of Physics* defendía hace años que el propio investigador debiera decidir sobre qué investigar; es difícil que Comités, Directores, expertos comerciales ó financieros, acierten al planificar investigación por la propia naturaleza de ésta.

Concentración y planificación interesan por el énfasis reciente en la importancia de Nueva Tecnología para las empresas y los países. En realidad ha habido nueva tecnología, ininterrumpidamente, desde el nacimiento de la Ciencia en el siglo diecisiete. Se podría ocupar el tiempo de este discurso con la enumeración de máquinas, instrumentos ó procesos aparecidos en ese período. Ciertamente la Tecnología cambió el mundo y confirió poder; de lo que hay ejemplos tempranos en la confrontación del Occidente ilustrado con Japón ó el Imperio Turco. Lo que importa es que nueva tecnología requerirá nuevo conocimiento, como en el pasado. El uso óptimo de fenómenos naturales exige comprenderlos muy bien; el imperativo es investigar.

El saber técnico, Ciencia e Ingeniería, confieren poder; pero no al investigador. Sin poder es más difícil atraer a las mentes brillantes, de lo que hay ejemplos a lo largo de la historia. Desde los años ochenta, los jóvenes afluyen masivamente a los estudios económicos y empresariales. En 1830, un matemático inglés, el creador de la primera computadora automática, Charles Babbage, se lamentaba de que en Inglaterra los alumnos más brillantes estudiaban Derecho, veinte años antes, un físico, John Playfair, ya describía los estragos de esa situación: no más de doce matemáticos británicos podían leer la *Mecánica Celeste* de Laplace. En un papiro egipcio de hace treinta y un siglos se guardan estos consejos de un padre al hijo: "...pon tu corazón en la escritura para protegerte de los trabajos duros. El

escriba es quien manda, esta libre de tareas de artesano. Nunca ví al hombre de la fragua o la herrería en una embajada"

Las Escuelas americanas de postgrado en Ciencia y Ingeniería deben acudir a extranjeros ó inmigrantes para ocupar la mitad de sus plazas. Allí, sin embargo, pueden juzgar esto de modo positivo: obtienen provecho de la preparación ajena. Sería deseable que en España aprovechásemos al menos la preparación adquirida por nuestros propios investigadores jóvenes. Recordando a Irving Langmuir en General Electric, sería también deseable que la empresa usase su poder y se uniese a la Universidad en la investigación de problemas de gran alcance. Creo que en Ciencia y Tecnología no caben programas de atajo. Países con tradición y presente de excelencia investigadora pueden preguntarse porque no es hoy mejor su tecnología. Este no parece el caso de España, donde, como todos sabemos, hay un terrible lastre histórico: una deuda con la Ciencia y la Tecnología, en forma de investigación y resultados, que aún no hemos pagado.

Creo que podemos pagar esa deuda histórica porque no cabe dudar que hay fenómenos por descubrir y comprender, dispositivos, procesos y máquinas por inventar y optimizar. En una obra sobre Física del año 62 de nuestra era, *Naturales Quaestiones*, Séneca nos lo dejó escrito, al final del libro VII, sobre los cometas: "La naturaleza no descubre sus misterios de una sola vez. Muchos fenomenos desconocidos para nosotros los conocerá la gente de tiempos venideros. Una sola generación no basta para investigar tantos fenómenos: a través de continuos relevos quedarán explicados." En la Universidad, el investigador sabe que prácticamente todo lo que enseña era desconocido antes del siglo dieciocho, ó diecisiete. Por otra parte, el pago de la deuda es gratificante. Un ingeniero, Augustin Fresnel, cuya obra sobre Óptica alcanzó limitado reconocimiento en vida, habló del placer de descubrir una verdad teórica ó confirmar un calculo experimentalmente. Ya que no de poder, cualquier investigador puede participar de ese placer en alguna medida, placer que ya había señalado aquel filósofo griego que, según dijo, preferiría descubrir una ley causal a ser Gran Rey de Persia.

Eso es todo. Gracias por su atención.

JUAN RAMÓN SANMARTÍN LOSADA

Excmo. Señor Presidente  
Excmos. Señores Académicos  
Señoras y Señores,

Constituye para mí una gran satisfacción y un privilegio estar aquí para contestar al discurso extraordinario que acabamos de escuchar del Profesor Juan Ramón Sanmartín.

El discurso se refiere a un medio, el plasma, que no nos es familiar, aunque constituye el 99% de la materia no oscura del Universo, y por ello su conocimiento es de tanta importancia para nuestra comprensión de la naturaleza. El comportamiento de los plasmas es muy complejo, y sólo podremos entenderlo apoyándonos en una variedad de conceptos nuevos como los utilizados, con un lenguaje no matemático, por el Profesor Sanmartín al describir algunos de los problemas que han sido centrales en su actividad profesional.

A pesar de la obligada profundidad y densidad de los nuevos conceptos, el discurso nos muestra una panorámica fascinante en torno al mundo de los plasmas. Urge sin embargo, que la Academia o el nuevo Académico ponga pronto a la disposición de Ustedes la versión escrita de su discurso, para una lectura reposada libre de las limitaciones de tiempo de este acto.

Juan Ramón Sanmartín nació en La Estrada a 20 Km de Santiago de Compostela donde siguió los cursos de Preu y Selectivo antes de venir a Madrid para estudiar Ingeniería Aeronáutica. Completó brillantemente estos estudios, con el número uno de su promoción, en 1965, al mismo tiempo que los de Ciencias Físicas. Su actividad investigadora se inició también en este período como becario del INTA, publicando, un año antes de terminar su carrera, en la Revista de Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica, su primer trabajo con el título "Cuerpos de forma óptima en vuelo hipersónico".



Los que fuimos sus profesores pronto supimos de la extraordinaria valía y gran curiosidad intelectual de Juan Ramón Sanmartín y su enorme capacidad para adquirir conocimientos sólidamente fundamentados. Su paso fulgurante por nuestra Universidad fué sólo el comienzo de una carrera científica también excepcional. En menos de dos años completó sus estudios de Doctorado en la Universidad de Colorado desarrollando la teoría de la medida de la densidad electrónica en plasmas, cuando estos están sometidos a campos magnéticos.

Juan Ramón Sanmartín abordó ya en su Tesis Doctoral en la Universidad de Colorado, uno de los problemas básicos para la experimentación en plasmas: la medida de la densidad electrónica y de las temperaturas distintas de los iones y electrones. La medida no puede hacerse de modo fiable sin disponer de una base teórica para la misma. Aunque existía una teoría para la medida de la densidad electrónica con sondas de Langmuir en ausencia de campos magnéticos, su comportamiento en presencia de estos campos sólo se conoció después de la publicación de la Tesis Doctoral de Sanmartín.

A continuación pasó dos años como Investigador Asociado en la Universidad de Princeton, en el Gas Dynamics Laboratory y en el Plasma Physics Laboratory, entonces el Laboratorio más importante dedicado a los estudios de fusión nuclear por confinamiento magnético. Allí Sanmartín estuvo ocupado en el estudio de las inestabilidades del plasma y del calentamiento del mismo mediante radiaciones electromagnéticas de alta frecuencia.

Posteriormente, antes de regresar a España, pasó dos años en el Departamento de Ingeniería Mecánica del MIT, trabajando de nuevo en la teoría de sondas en plasmas.

A su vuelta a España pasó a ser uno de mis colegas en el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial y también en la Escuela de Ingenieros Aeronáuticos. En el INTA trabajó en diversos proyectos relacionados con la Ingeniería Aeroespacial, subvencionados por la ESRO, entre ellos el desarrollo de los métodos de diseño de cohetes para el control de actitud de satélites basados en la descomposición térmica de la Hidracina. También

trabajó, ya a principios de la década de los 70, en la formación de óxidos de Nitrógeno en la Combustión

En 1974 gana por oposición la Cátedra de Física en nuestra Escuela de Ingenieros Aeronáuticos, de la que hoy es Subdirector de Investigación y Doctorado

Desde 1975, cuando dejó el INTA, ha venido trabajando, como señaló en su discurso, en los problemas de interacción laser-plasma asociados a la Fusión Nuclear por Confinamiento Inercial y en las diversas aplicaciones de amarras y cables conductores en el Espacio. En estos campos ha formado una escuela que goza de un bien merecido prestigio internacional por la cantidad y especialmente por la calidad de sus aportaciones. El prestigio internacional y nacional del Profesor Sanmartín se basa también en la calidad y cantidad de sus publicaciones y conferencias en Congresos. Ha sido Profesor Visitante en la Universidad de Colorado, en el MIT, y en el Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, centros con los que mantiene una colaboración permanente

Él me atribuye la orientación de su actividad investigadora hacia los plasmas y su papel en la Ingeniería Aeroespacial. Sin embargo esta inclinación es más bien consecuencia del momento en que él inició su actividad profesional. En 1957, con el Sputnik, nace la era espacial y en 1961 se crea la COPERS, organismo europeo para la Investigación Espacial que se convertiría en 1964 en la ESRO. La preocupación del INTA por el espacio nació pronto. La Ingeniería Aeronáutica en España, al igual que en otros países, vio al espacio como campo natural de extensión de su actividad. El INTA organizó en 1960 un Curso excelente de Ingeniería Aeroespacial en el que tuvimos ocasión de escuchar a los especialistas extranjeros más prestigiosos, también inició su cooperación con la NASA, con las estaciones de seguimiento, y presionó para la participación española en la COPERS y ESRO. En 1963 se creó la CONIE (Comisión Nacional de Investigación del Espacio).

Mi propia actividad investigadora que nació al mismo tiempo que la era espacial estuvo teñida con esas preocupaciones del espacio, en las que el plasma tuvo un papel importante. Mi acercamiento a la Física del Plasma se hizo más intenso durante mi estancia en el Instituto Tecnológico de

California, en 1962-1963, apoyada por una beca NASA-ESRO. A mi vuelta ofrecí un Curso sobre Física del Plasma, cuya virtud esencial fué despertar algunas vocaciones en jóvenes tan brillantes que pronto hicieron aportaciones que yo nunca habría soñado.

Alfonso Faus pronto publicó uno de los primeros intentos de estimación de la posición de la onda de choque que transforma en subsónico el viento supersónico que emana del sol. También analizó la estela que en este viento deja la Luna, que por carecer de campo magnético interacciona con el viento solar de modo muy distinto a la Tierra. José Luis Sagredo estudió los silbidos atmosféricos asociados a la reflexión por la ionosfera de las ondas de radio.

Cuando Faus y Sagredo se incorporaron al INTA a su vuelta a España jugaron un papel importante en la definición y aprovechamiento del INTASAT como faro ionosférico. Las señales emitidas por el satélite, de 40 y 41 MHz, linealmente polarizadas, al atravesar la ionosfera sufrían rotaciones cuya medida permitía calcular el valor total del contenido de electrones de la ionosfera por encima de las 36 estaciones terrestres, de 24 países, que recibían estas señales.

Las aportaciones de Juan Ramón Sanmartín en la Física del Plasma, que he seguido muy de cerca, han sido tantas y de tal calidad que enseguida pasó a ser mi maestro en mis escasas excursiones posteriores en ese campo.

Su actividad investigadora se ha desarrollado principalmente en dos grandes líneas, sobre aplicaciones que involucran electromagnetismo y teoría cinética de los plasmas

*Interacción conductor-plasma* - i) En la teoría de la interacción entre el plasma y una sonda de Langmuir, puede considerársele un experto a nivel mundial, junto a James Laframboise de Canadá y Lee Parker de Estados Unidos. El estudio de Sanmartín sobre sondas en presencia de un campo magnético intenso, teniendo en cuenta efectos de colisión y de carga espacial, fué validado experimentalmente en 1981 por Kawaguchi y Tanaka, de Mie University, en particular la predicción de un fenómeno de sobrevalor en el potencial eléctrico a lo largo de la sombra magnética de la

sonda. Ese estudio permanece, al cabo de un cuarto de siglo, como análisis básico para las aplicaciones de las sondas en el espacio y en el laboratorio (como atestigua un review de Sonmor y Laframboise de 1993 en el *J of Geophysical Research*). Por otra parte, el análisis de Sanmartín sobre efectos transitorio y de extremo en sondas cilíndricas sin campo magnético, que permiten la medición de la temperatura iónica en el laboratorio ó a bordo de un satélite, fué validado experimentalmente por Parazzoli en el MIT, Fournier y Pigache en la ONERA, y Mercure, en una Tesis Doctoral, en Toronto. El efecto de extremo había sido encontrado casualmente por Bettinger y Chen, en un experimento a bordo del satélite Explorer 17.

ii) En la electrodinámica de amarras espaciales, el concepto de amarra conductora sin aislante ni electrodo para una eficaz captura de electrones ionosféricos, concebido en la E.T.S.I. Aeronáuticos, ha supuesto una cierta revolución. El concepto fué recomendado por un panel científico a ESA como un experimento de los Columbus Precursor Flights, suprimidos por razones económicas a fines de 1992. Presentado en un "White Paper" a NASA, con el MIT y el Smithsonian Astrophysical Observatory, el Marshall Space Flight Center tiene ya un experimento para su demostración (ProSEDS), programado para ponerlo en órbita, dentro de dos años, a bordo de un Delta 2. El concepto formó parte una propuesta a NASA, encabezada por el Southwest Research Institute. NASA podría usar amarras sin aislante para generación de potencia y recuperación de órbitas "reboost" en la próxima Estación Espacial Internacional. En el JPL de Pasadena se está considerando su uso para la exploración de la luna Europa.

*Interacción laser-plasma* - Poco después de que Silin, en el Instituto Lebedev, y Goldman y DuBois, entonces en Harvard, descubrieran la primera inestabilidad paramétrica en plasmas ("decay instability", en la que se excitan ondas Langmuir y acústica), Sanmartín, e independientemente Nishikawa, de la Universidad de Hiroshima, descubrieron la segunda inestabilidad paramétrica ("oscillating two-stream instability", en el que un modo a frecuencia cero sustituye a la onda acústica). Por otra parte, de 1975 a 1990, Sanmartín desarrolló en la E.T.S.I. Aeronáuticos un trabajo de equipo (continuado en la actualidad en dos grupos activos) sobre la

interacción entre laser y materia y sus aplicaciones en Fusión Inercial. La investigación proporcionó modelos básicos para el análisis de una extensa variedad de aspectos fluidodinámicos del fenómeno: Generación de la presión de ablación en una expansión plana ó estacionaria; presión de la radiación láser y Langmuir; absorción de resonancia; absorción de Bremsstrahlung inverso; flujo de calor no-local; autoenfocado térmico de la luz láser; generación de campo magnético en la expansión; efectos de irradiación no uniforme y de dos temperaturas electrónicas; rendimiento hidrodinámico del acoplamiento láser-plasma.

Por último, quiero añadir algunas consideraciones respecto al papel que la investigación tiene en el desarrollo de la Ingeniería cuando aquella se hace a la vista de los objetivos de ésta.

El Diccionario de la Real Academia Española define la Ingeniería como el conjunto de conocimientos que permiten aplicar el saber científico a la utilización de los materiales y de las fuentes de energía mediante invenciones o construcciones útiles para el hombre.

Los que nos ocupamos de la Ingeniería sabemos bien que los sistemas complejos que nos preocupan sólo pueden desarrollarse mediante saberes y tareas de carácter muy variado, como son la investigación y desarrollo, el diseño, la construcción y fabricación y por último la operación y el mantenimiento. Sanmartín ha contribuido muy eficazmente a la primera de esas facetas de la Ingeniería: La investigación, teniendo siempre muy en cuenta el objetivo ingenieril final, tanto en sus estudios sobre las sondas para la medida, como en sus estudios sobre fusión nuclear, y en sus estudios sobre las amarras espaciales.

En el mundo competitivo actual, en que el éxito es tan dependiente de la capacidad de innovación tecnológica, no podemos dejar a la improvisación basada en el ingenio o a la experimentación sin base científica sólida la solución de los problemas complejos.

Sanmartín ha llevado a cabo unos estudios sobre el Botafumeiro, publicados en el American Journal of Physics en 1984 y en Investigación y Ciencia y en Pour la Science en 1990, que ilustran bien la singularidad

y difícil repetitividad de algunos hallazgos experimentales de la Ingeniería

El Botafumeiro es un incensario que desde el siglo XIII está funcionando en la forma actual en la Catedral de Santiago de Compostela. Es de latón plateado, pesa 58 Kg, y oscila como un péndulo, colgado mediante una cuerda que está devanada en dos tambores de 58 y 29 cm de diámetro, con el eje común apoyado mediante unos cojinetes de deslizamiento en una estructura soporte en lo alto de la cúpula de la catedral.

Del otro extremo de la cuerda tiran ocho sacristanes, a las órdenes del sacristán mayor, de manera que después de un empujón inicial el incensario toma un movimiento pendular con amplitud creciente, en un plano del transepto de la catedral, gracias al diseño de la estructura soporte.

Cuando el Botafumeiro pasa por su posición más baja a 20 m del eje de los tambores, los sacristanes tiran de la cuerda acortando súbitamente la longitud del péndulo en unos tres metros, gracias al efecto duplicador del desplazamiento realizado por los sacristanes, ya que el segundo tambor tiene diámetro doble que el primero. Los sacristanes dejan caer el botafumeiro cuando pasa por su punto más alto. La cuerda, cuyo diámetro ha variado en el tiempo entre 3,5 y 4,2 cm, no puede ser más gruesa para evitar el crecimiento de su resistencia aerodinámica, ni más fina para evitar la rotura.

No se alcanzarían los 82 grados de amplitud de la oscilación si el peso y tamaño del incensario no fuesen lo que son y la longitud del péndulo fuese más grande. El mecanismo de doble tambor, así como la forma casi instantánea de tirar y soltar la cuerda en el momento apropiado, son también imprescindibles para poner el Botafumeiro en oscilación, con amplitud tan grande, mediante bombeo o resonancia paramétrica.

Si el modo de sujeción permitiese excursiones del Botafumeiro fuera del plano del movimiento, éste podría adquirir un carácter caótico y así ocurriría también si no se hiciese el bombeo tirando y cediendo en fase con la oscilación del péndulo. Con motivo de estos estudios, Sanmartín, junto con López Rebollal, descubrió un modo duro de transición al caos en sistemas dinámicos.

El desarrollo de los sistemas complejos de Ingeniería actuales no pueden dejarse a las felícisimas casualidades que se dieron en el descubrimiento de operación del Botafumeiro.

Yo he tenido el privilegio de haber tenido en Juan Ramón Sanmartín un discípulo excepcional, que pronto se convirtió en mi amigo íntimo, mi compañero de trabajo y también mi maestro. Hoy me toca la honrosa tarea de darle la bienvenida en nombre de la Academia.

Muchas Gracias.

AMABLE LIÑÁN MARTÍNEZ